

大面积曲面微带天线共形焊接工艺

张郭勇

(中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036)

摘要: 【目的】旨在解决某高密度大面积曲面微带天线共形焊接制造难度大、风险高的难题。【方法】通过对该微带天线的结构特点和工艺难点进行分析,从焊接工装设计、焊料预置设计、焊接方法设计、抗焊接形变设计等方面对曲面微带天线的共形焊接工艺进行了研究,得出了适用于该大面积曲面微带天线共形焊接的制造工艺,并对微带天线样件进行了焊接生产和焊后检测。【结果】结果表明,该种焊接工艺实现了高密度大面积曲面微带天线的共形焊接。【结论】该种焊接工艺对类似天线的焊接具有一定指导意义。

关键词: 曲面共形; 大面积焊接; 焊接工装; 真空气相焊

中图分类号: TG454 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20240313004](https://doi.org/10.12073/j.hj.20240313004)

Conformal welding process of large-area curved microstrip antenna

ZHANG Guoyong

(The 10th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

Abstract: [Objective] The aim is to solve problems of high difficulty and risk in manufacturing of a high-density and large-area curved microstrip antenna by conformal welding. [Methods] By analyzing structural characteristics and technological difficulties of microstrip antenna, conformal welding process of curved microstrip antenna is studied from aspects of welding tooling design, solder preset design, welding method design and anti-welding deformation design. Conformal welding process of large-area curved microstrip antenna is obtained. Moreover, welding production and post-welding inspection of microstrip antenna samples are carried out. [Results] The results show that the welding process realizes conformal welding of high-density and large-area curved microstrip antenna. [Conclusion] The welding process has certain guiding significance for the welding of similar antenna.

Key words: surface conformal, large-area welding, welding tooling, vacuum vapor welding

0 前言

近年来,在航空航天飞速发展的背景下,共形天线越来越朝着轻量化、小型化、集成化的方向发展^[1]。微带天线作为一种典型的共形天线,具有结构简单、质量较轻、易与曲面共形、造价低、便于生产制造等优势,逐渐受到各国研究人员的青睐^[2]。然而,随着机载平台对低雷达反射面积(Radar cross-section, RCS)和气动性能要求的逐渐升高,微带天线与载体表面之间的共形也就显得至关重要^[3-4]。就目前研究而言,

微带天线与大面积载体表面之间的共形通常采用导电胶粘接与焊接2种连接方式^[5];相比于导电胶粘接工艺,微带天线焊接技术具有结构强度大、热导率高和微波损耗小等优点,尤其适用于微带天线与大面积曲面载体的共形焊接。

基于微带天线的焊接优势,部分研究学者对此进行了探索。夏林胜等学者^[6]以某T/R组件为例,从基板定位、焊料选择和焊接工艺的确定,以及从焊接工艺参数优化出发,最终解决了微波组件多基板焊接技术难题。皋利利等学者^[7]研究了不同焊接工艺

方法、焊膏量和焊接材料(Sn63Pb37, Sn3.5Ag)等对微带板与垫板之间大面积钎焊质量的影响。王晶^[8]采取真空钎焊的方法对微带板与盒体之间进行了大面积钎焊研究,最终使焊透率达到了60%以上。谭小鹏^[9]则利用回流焊工艺作为焊接方法,通过制作工装实现了天线的一体化装配,结果验证出该试验条件下天线的质量及电性能满足设计要求。

尽管上述研究成功实现了微带板与载体基板之间的焊接,但对于大面积曲面微带天线共形焊接的研究却尚不成熟,高密度大面积曲面天线阵面共形焊接工艺技术尚需攻关。因此,该文从焊接工装设计、焊料预置设计、焊接方法设计、抗焊接形变设计等方面对大面积曲面微带天线的共形焊接进行了研究,实现了高密度大面积曲面微带天线的共形焊接,为后续同类产品的焊接提供参考。

1 结构及工艺分析

某机载天线辐射阵面由微带板和金属底板组成,如图1所示,该微带天线最大外形尺寸为355.5 mm×355.5 mm×30.8 mm,阵元3 000余个,最小阵元间距为3.5 mm。微带板采用聚四氟乙烯复合材料TSM-DS3,厚度为1.6 mm,背面采用大面积接地铜,布设3 000余个直径为 $\phi 0.5$ mm的焊盘,焊接时重点保证微带片的焊盘与金属基板毛纽扣安装孔的中心对位关系,同时单个阵元自屏蔽接地良好,阵元焊盘与接地面无短路,阵元间无贯穿空洞。

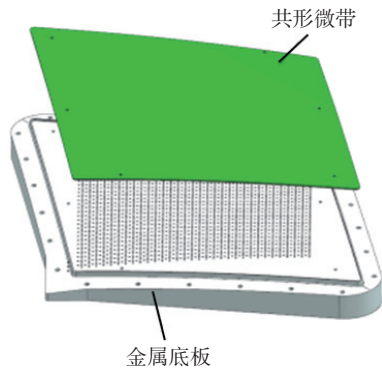


图1 微带天线与曲面金属底板的装配示意图
Fig. 1 Assembly diagram of microstrip antenna and curved metal base plate

整个微带天线采用微带曲面共形技术,结构紧凑,阵元规模大、阵元密度高、共形难度大。该微带天线的结构设计要求及制造难点分析如下:①共形焊接

难度大。由于采用的是平面微带板,而微带板自身具有一定的刚性,因此,必须施加足够的压力确保微带板与金属底板紧密贴合。此外,为避免焊料溢出造成短路、污染焊盘,需要控制压力在一定范围内,同时还需针对焊接过程中助焊剂排除带来的高度变化实施动态补偿。②阵元密度大。由于阵元密度相对较大,因此,每个阵元与馈电射频通道的内外导体形成短路的风险及射频通道的自身屏蔽难度同步增大。另外,在焊接工艺上,由于助焊剂的挥发需求,不可避免的存在焊接空洞、锡珠飞溅等焊接缺陷。③变形及对位精度控制难,微带天线精度要求焊接后变形小于0.2 mm。由于微带天线的材料组成主要为微带板和铝合金,其中微带板采用聚四氟乙烯复合基板,而金属底板则采用铝合金5A06,两者存在较大热膨胀系数差异,极易产生变形。此外,由于铝合金金属结构件为不等厚、非对称异形结构,自身刚性不足,且热容量较大,因而在焊接时难免会存在受热不均匀的现象,最终导致微带天线变形。

根据以上制造难点,该文从焊接工装设计、焊料预置设计、焊接方法设计和抗焊接形变设计4个方面出发,对大面积曲面微带天线的共形焊接进行相关研究,如图2所示,得到了适用于该高密度大面积曲面微带天线共形焊接的制造工艺。

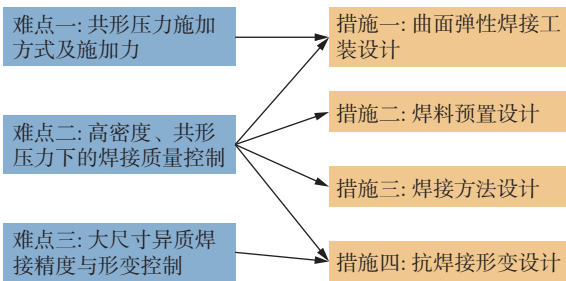


图2 焊接工艺技术分解图
Fig. 2 Breakdown diagram of welding technology

2 焊接工艺设计

2.1 曲面弹性焊接工装设计

针对大面积曲面焊接工艺技术对压力控制高的要求,首先开展曲面弹性焊接工装的设计。采用弹性压持技术进行焊接装夹,同时通过控制弹簧阵列的压缩量大小来实现接触点均匀受力。另外,考虑到微带天线边缘和中部微带板弯曲弧度不一致,所需应力不一致,曲面弹性焊接工装采用三段式设计,

具体设计如图3所示。可以看出,焊接工装采用了减重镂空设计以减小焊接工装的重量,且该设计能加快产品温度的升高和下降,使焊接过程中助焊剂能够从空洞中挥发,避免焊接面形成焊接空洞。

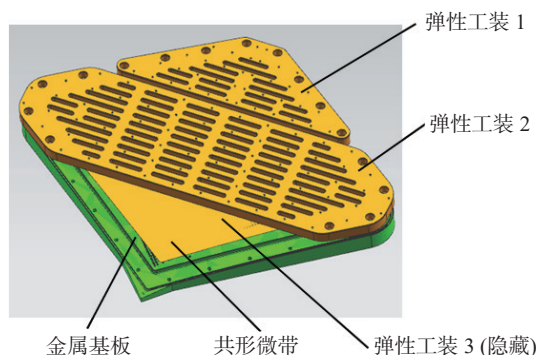


图3 曲面弹性焊接工装装配图

Fig. 3 Assembly diagram of surface elastic welding tool

弹性焊接工装内部设计有弹簧和顶柱结构,并通过在工装与微带板之间放置不同厚度的垫片来控制弹簧压缩量,最终实现压力的准确控制,确保微带板与金属底板紧密贴合,顶柱和弹簧安装情况如图4所示。

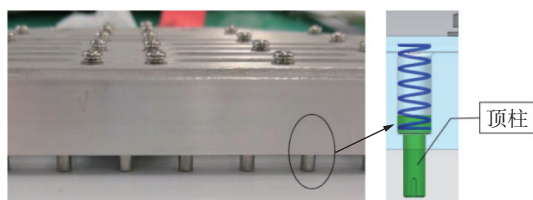


图4 弹性顶柱安装图

Fig. 4 Installation diagram of elastic top column

分析曲面弹性焊接工装的优势发现:该设计一方面可纠正微带自身翘曲达到共形焊接,使微带板与金属基体各曲面位置形成紧密的接触,并有利于接触反应的进行及助焊剂的挥发和表面氧化物的排出,达到降低焊接空洞率的目的;另一方面,通过对各处压力的均匀控制,使焊料在一定范围内不溢出、不堵孔、不造成与馈电孔的短路等严重缺陷。同时,在焊接过程中,随着温度的变化,弹力的存在可以对微带进行适时的弹性补偿,确保焊料熔化过程中微带板与金属基体表面始终紧密贴合。

2.2 焊料预置设计

为实现微带天线的高可靠性焊接,满足机载天线在高振动环境中的使用要求,需要选取合适的焊接

材料,并设计合适的焊接材料预置方法。电子行业中常用的焊接材料分为有铅焊料和无铅焊料,有铅焊料因其焊点机械强度高、焊接更可靠的优点,在航空航天等军用电子装备中被广泛使用。有铅焊料中,Sn63Pb37焊料因其良好的工艺性和焊接性能,是电子装联应用最广泛的焊接材料。因此,文中微带板与金属基板的焊接材料选用Sn63Pb37。

常规的焊接材料有焊片和焊膏2种焊料形态,由于目前常规的焊片宽度为100 mm,焊片预置方式无法满足焊接幅面的要求(355.5 mm×355.5 mm),因而选用Sn63Pb37焊料,采用焊膏印刷的方式进行焊料预置。如图5所示,采用钢网印刷的方式将焊膏印刷至微带板焊接面,同步设计了焊膏印刷工装,钢网厚度为0.1 mm,采用定位销定位,漏锡量控制在60%~65%之间,确保理论焊锡层厚度控制在0.055 mm左右。

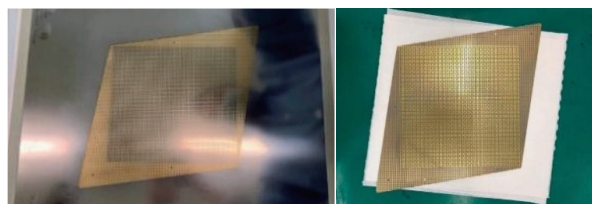


图5 焊膏预置效果

Fig. 5 Preset effect of solder paste

2.3 焊接方法设计

基于高密度大面积曲面微带天线共形焊接对焊接时间、传热效率、温度控制精度的要求,优选真空气相焊为焊接方法。该焊接方法主要依靠气相液加热,通过调整真空气相焊设备气相液喷射量与喷射时间对加热温度进行调控,能够快速达到设置温度曲线。该焊接方法温度控制准确,设备加热仓内温度偏差小,样件受热均匀,尤其适用于大热容量、大面积的样件焊接。此外,与其他焊接工艺相比,真空气相焊是在一个相对密闭且有抽真空辅助的条件下进行,能够有效排除焊料中由助焊剂挥发产生的气泡,大大降低焊接面空洞率。

依据设备自带温度测试系统,对微带天线焊接的真空气相焊参数进行试验研究。利用测温样件,如图6所示,通过设置合理的真空气相焊焊接温度和真空度以达到微带天线大面积、高焊透率共形焊接的目的。

通过多次试验和实际测温,调整各阶段汽相液喷射量、时间和真空度等参数,得出优化后的真空气相

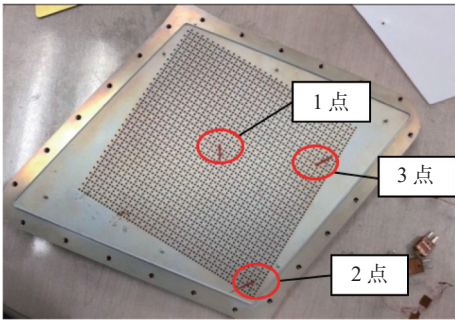


图6 温度测试点布设位置
Fig. 6 Location of temperature test point

焊的焊接温度曲线,如图7所示。从图7可以看出,焊接升温阶段时间较长,气相液注入量较少,这一做法主要为保证微带天线及工装的整体温度均匀性;随后继续注入大量气相液,使加热仓内温度上升至焊接温度并保温一段时间,保证微带天线共形焊接完成;焊接完成后抽出气相液,对微带天线进行冷却降温。

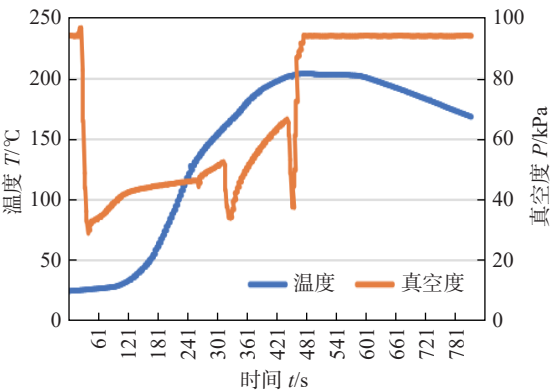


图7 焊接温度曲线图
Fig. 7 Diagram of welding temperature curve

根据该大面积微带天线焊接的空洞数量和气泡产生原因,有针对性的设置特定的真空度,确保焊接过程中气泡排出,提高焊接焊透率。在焊接初始即对设备加热仓进行抽真空处理,并使加热仓在整个焊接过程中一直保持在负压状态,便于焊接面空气及助焊剂的排出;第二次抽真空是温度达到了160℃时,此时焊膏中的助焊剂中的溶剂处于挥发阶段,焊料还未熔融,这时抽真空能将挥发出的气体排出;最后一次抽真空设置是在最后焊接阶段,这时温度达到峰值且焊料处于熔融状态,对加热舱进行抽真空处理能够去除焊接面未挥发的助焊剂及空气。真空气相焊焊接工艺参数见表1。

表1 真空气相焊焊接工艺参数
Tab. 1 Vacuum vapor welding parameters

阶段	汽相液量 V/mL	设置温度 $T/^{\circ}\text{C}$	真空度 P/kPa	保持时间 t_1/s
预热	0	25	30	—
加热 1	600	160	—	210
加热 2	300	170	40	55
加热 3	1 500	205	60	110
回收冷却	0	—	—	600

2.4 抗焊接形变设计

由于微带板与铝合金基材热膨胀系数差异明显,同时金属基体在加热和冷却过程中应力会重新分配,导致焊接后微带天线发生变形,超过最大设计容差。针对这种情况,采用抗焊接形变装夹技术,设计一种抗焊接形变工装,用于在真空气相焊时对金属基板进行校形,在一定程度上减缓金属基板的变形。该工装具有以下特征和功能:①工装具备足够的刚性和较低的重量,既满足焊接设备的承载能力,又能防止其自身在校形过程中发生大幅变形;②工装底部平面度较好,要求在0.05 mm以内,并采用螺装方式使工作面与基板底部平面紧密贴合;③工装四周设计数量合适的螺纹孔,在装配时,利用螺钉对基板四周进行支撑,减缓其在焊接过程中变形;④工装底部设计有排气槽,防止在焊接过程中因排气不畅而影响焊接质量。图8为该微带天线的抗焊接形变工装模型图和抗焊接形变工装安装实物图。

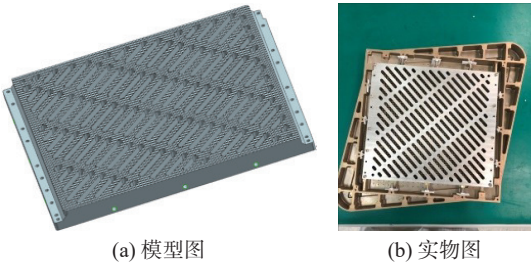


图8 抗焊接形变工装
Fig. 8 Anti-welding deformation tooling. (a) diagrammatic figure;
(b) real picture

通过三坐标测量仪对焊接前后微带天线金属基体底部平面进行测量,见表2。对比表明:使用抗焊接形变工装后,能有效减缓金属基板在焊接过程中的变形,焊后平面度均保持在0.2 mm以内,满足微带天线的曲面形状精度和装配面的平面度要求。

表2 抗焊接形变工装对金属基板平面度的影响

Tab. 2 Effect of anti-welding deformation tooling on flatness of metal substrate

编号	有无工装	平面度 f_{lat}/mm		变化值 $\Delta f_{lat}/mm$
		焊前	焊后	
1	无	0.109	0.270	+0.161
2	无	0.173	0.358	+0.185
3	无	0.024	0.160	+0.136
4	有	0.069	0.159	+0.090
5	有	0.090	0.171	+0.081
6	有	0.103	0.188	+0.085

3 焊接及焊后检测

通过从焊接工装设计、焊料预置设计、焊接方法设计和抗焊接形变设计4个方面对大面积曲面微带天线的共形焊接进行了研究,得出了适用于该高密度大规模曲面微带天线共形焊接的制造工艺。采用该制造工艺方法,焊接出的曲面微带天线如图9所示。经检验,曲面微带天线的尺寸精度满足设计要求,焊接后变形小于0.2 mm。图10为曲面微带天线的X-

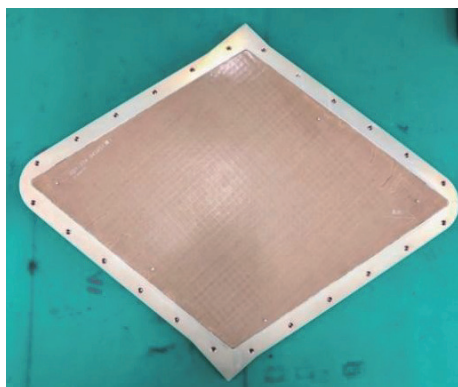


图9 大面积曲面微带天线焊接成品

Fig. 9 Large-area curved microstrip antenna welding product

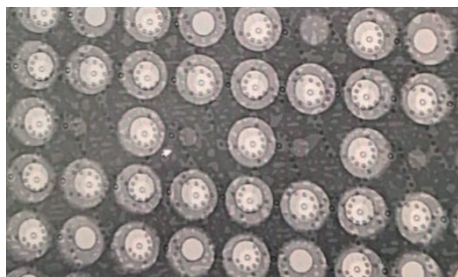


图10 X-RAY设备的检测结果

Fig. 10 Test result by X-RAY

RAY检查结果。检验发现:单个阵元自屏蔽接地良好,阵元焊盘与接地面无短路,焊透率不小于75%,满足设计要求。经应力筛选、高低温工作、功能振动、振动冲击等环境验证发现指标合格,相邻通道隔离度不小于40 dB,单元驻波比不大于2,均达到设计要求。

4 结论

(1)通过曲面弹性焊接工装设计,解决了微带天线共形焊接过程中压力不均匀的难题,实现了焊接过程中微带板和金属基板之间紧密贴合以及压力自适应调节。

(2)通过焊料预置设计,选用Sn63Pb37有铅焊料,并采用钢网印刷的方式将焊料印刷在微带板上,实现了焊料量与焊料位置的精确控制。

(3)通过焊接方法设计,确定了大面积曲面微带天线的真空气相焊焊接工艺参数,实现了微带天线高焊透率焊接。

(4)通过抗焊接形变设计,有效减缓金属基板在焊接过程中的变形,满足了微带天线的曲面形状精度和装配面的平面度要求。

(5)通过以上4项工艺设计,得出了大面积曲面微带天线共形焊接的制造工艺,实现了高密度大规模曲面微带天线的共形焊接,各方面指标均满足设计要求。

参考文献

- [1] 朱松. 共形天线的发展及其电子战应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007(6): 562 – 567.
ZHU Song. Development of conformal antenna and its EW applications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2007(6): 562 – 567.
- [2] 周冲. 共形微带天线仿真与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHOU Chong. Simulation and design of conformal microstrip antenna[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] SCHIPPERS H, VERPOORTE J, JORNA P, et al. Conformal phased array with beam forming for airborne satellite communication[C]//Darmstadt, Germany: 2008 International ITG Workshop on Smart Antennas, 2008.
- [4] 苏欣. 曲面微带天线焊接技术研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(6): 50 – 52.
SU Xin. Research on soldering technology of curved microstrip antenna[J]. Welding Technology, 2021, 50(6):

50 – 52.

- [5] 王禾, 闵志先, 潘旷, 等. 电子产品大面积钎焊用钎剂的研究 [J]. 电子工艺技术, 2018, 39(6): 311 – 316.
WANG He, MIN Zhixian, PAN Kuang, et al. Research on flux for large area soldering of electronic products[J]. Electronics Process Technology, 2018, 39(6): 311 – 316.
- [6] 夏林胜, 原辉. 微波多基板组件焊接工艺研究 [J]. 电子工艺技术, 2020, 41(3): 163 – 165, 169.
XIA Linsheng, YUAN Hui. Research on soldering process of microwave multi-substrate module[J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(3): 163 – 165, 169.
- [7] 皋利利, 包晓云, 王丽虹, 等. 微带板高钎透率大面积钎焊技术研究 [J]. 电子工艺技术, 2015, 36(1): 15 – 17.
GAO Lili, BAO Xiaoyun, WANG Lihong, et al. Large area soldering technology research of substrate with high soldering rate[J]. Electronics Process Technology, 2015,

36(1): 15 – 17.

- [8] 王晶. L 波段有源微波组件低温真空钎焊工艺研究 [J]. 安徽科技, 2011(10): 38 – 39.
WANG Jing. Study on low-temperature vacuum brazing technology of L-band active microwave components[J]. Anhui Science & Technology, 2011(10): 38 – 39. (in Chinese)
- [9] 谭小鹏. 某天线装焊质量改进的工艺研究 [J]. 质量与可靠性, 2019(4): 16 – 20.
TAN Xiaopeng. A study on the improvement of fitting and welding quality of an antenna[J]. Quality and Reliability, 2019(4): 16 – 20.

第一作者: 张郭勇, 硕士, 高级工程师; 主要从事电气互联技术研究; 1163022125@qq.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

张郭勇. 大面积曲面微带天线共形焊接工艺[J]. 焊接, 2025(3): 91 – 96.

ZHANG Guoyong. Conformal welding process of large-area curved microstrip antenna[J]. Welding & Joining, 2025(3): 91 – 96.

(上接第 90 页)

- [11] CHEN Qihao, LIN Sanbao, YANG Chunli, et al. Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 39: 403 – 413.
- [12] 黄石生. 新型弧焊电源及其智能控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
HUANG Shisheng. Novel arc welding power source and its intelligent control[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2000.
- [13] 吴敏生, 段向阳, 李路明, 等. 电弧超声的激发及其特性研究 [J]. 清华大学学报, 1999, 39(6): 110 – 112.
WU Minsheng, DUAN Xiangyang, LI Luming, et al. Study of arc-ultrasonic excitation and its characteristics[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(6): 110 – 112.
- [14] 吴敏生, 何龙标, 李路明, 等. 电弧超声焊接技术 [J]. 焊接学报, 2005, 26(6): 40 – 44, 53.
WU Minsheng, HE Longbiao, LI Luming, et al. Study on

arc-ultrasonic welding technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(6): 40 – 44, 53.

- [15] 卢长亮, 胡芳友, 胡滨, 等. 超声振动对激光局部重熔 K418 高温合金残余应力的影响 [J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(5): 7 – 11.
LU Changliang, HU Fangyou, HU Bin, et al. Effects of ultrasonic vibration on residual stress of K418 alloy plate treated by laser remelting[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2012, 40(5): 7 – 11.
- [16] 赵磊, 曹团. 超声振动电弧复合焊接特性研究 [J]. 一重技术, 2015(5): 22 – 25.
ZHAO Lei, CAO Jian. Research about ultrasonic vibration-arc hybrid welding technique[J]. CFHI Technology, 2015(5): 22 – 25.

第一作者: 袁少波, 硕士, 高级工程师; 主要从事特种承压设备无损检测研究; neverbo@126.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

袁少波, 彭国平, 张勇. 超声振动复合 TIG 对 HG70 高强钢焊接接头组织及性能的影响[J]. 焊接, 2025(3): 86 – 90, 96.

YUAN Shaobo, PENG Guoping, ZHANG Yong. Influence of ultrasonic vibration assisted TIG on microstructure and mechanical properties of HG70 high strength steel welded joints[J]. Welding & Joining, 2025(3): 86 – 90, 96.